

06;07

Релаксация упругих напряжений в буферных слоях на основе пористых напряженных сверхрешеток InGaAs/GaAs

© Л.К. Орлов, Н.Л. Ивина, Ю.Н. Дроздов, Н.А. Алябина

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: orlov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 10 апреля 2002 г.

В окончательной редакции 8 июля 2002 г.

Обсуждаются возможные преимущества использования в качестве буферных слоев пористых релаксированных сверхрешеток InGaAs/GaAs. Рентгенодифракционный анализ и спектры фотолюминесценции от многослойных гетероэпитаксиальных структур InGaAs/GaAs, подвергнутых электрохимическому травлению, указывают на прохождение в слоях системы частичной релаксации упругих напряжений. Это дает возможность при использовании пористых сверхрешеток в качестве буферных слоев получать по отношению к буферным слоям как на основе пористого арсенида галлия, так и на основе монокристаллических периодических гетерокомпозиций, хоть и небольшой, но положительный эффект, связанный с понижением накапливаемой системой в процессе роста упругой энергии.

В последние годы предпринимаются значительные усилия по разработке методов выращивания монокристаллических низкодефектных упруго напряженных гетерокомпозиций с толщинами слоев и составом, превышающими допустимые для псевдоморфного роста критические значения. С этой целью рассматриваются различные варианты буферных слоев, позволяющие снизить, хотя бы частично, уровень упругих

напряжений, накапливаемых рабочей структурой в процессе роста. В обычных условиях однородного по составу буферного слоя твердого раствора (химического соединения) удастся перевести часть накопленной упругой энергии в пластическую деформацию, проявляющуюся на границе буфер–подложка [1–3] в виде сетки дислокаций несоответствия с плотностью $N_{DN} > 10^5 \text{ см}^{-1}$, при сохранении достаточно высокого кристаллического совершенства самого буферного слоя (плотность прорастающих дислокаций не превышает величину $N_{TD} \sim 10^5 \text{ см}^{-2}$). Однако данная процедура в большинстве известных случаев в силу объективных причин оказывается ограниченной по составу твердого раствора приблизительно 20%-ным содержанием одной из компонент гетеропары (например, Si для системы Ge/GeSi [1] либо Ge для системы Si/SiGe [2,3]). Чаще всего для достижения наилучших результатов используются релаксированные слои переменного состава с изменяющимся содержанием одной из компонент от 0 до 30 at.% [4] и многослойные периодические структуры [5], позволяющие, помимо прочего, перевести часть прорастающих дислокаций в краевые, уводя их тем самым на боковые грани кристалла.

Менее часто применяемое на практике, но достаточно заманчивое предложение связано с формированием на поверхности подложки пористого слоя и с использованием его в качестве буфера для последующего наращивания псевдоморфных слоев и сложных гетероэпитаксиальных структур. Предварительные эксперименты по росту слоев твердого раствора SiGe на пористом Si [6] и слоев тройного химического соединения InGaAs на пористом GaAs [7] показали обнадеживающие результаты, продемонстрировав лучшие структурные и электрофизические характеристики выращиваемых гетерокомпозиций. Эффект улучшения кристаллической структуры эпитаксиально наращиваемой рабочей системы псевдоморфных слоев связан, вероятнее всего, с уменьшением величины упругого воздействия на нее со стороны подложки вследствие неполного контакта (только по торцам межпористых перегородок), осуществляемого между осаждаемой гетерокомпозицией и пористым слоем на поверхности подложечного материала. С другой стороны, нельзя не принимать во внимание также и облегченную возможность стока неизбежно возникающих в структуре дислокаций несоответствия на хорошо развитую поверхность пористого слоя.

Очевидно, что совмещение достоинств всех перечисленных выше типов буферов может позволить выйти на качественно новый уровень эпитаксии напряженных гетерокомпозиций с толщиной слоев

и соотношением компонент в системе более высокими, нежели это практикуется на сегодняшний день. Необходимо только показать, что создание пористой поверхностной матрицы на базе предварительно изготовленной псевдоморфной либо частично релаксированной гетерокомпозиции действительно может позволить снять, хотя бы частично, накопленную в монокристаллическом буферном слое упругую энергию деформации решетки.

Получить конкретный ответ на поставленный выше вопрос и являлось основной целью данного исследования. В качестве исходной структуры, которая могла бы послужить буфером для выращивания на ней более сложной гетерокомпозиции, нами была выбрана многослойная псевдоморфная периодическая структура $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ (100), выращенная на арсениде галлия и содержащая 10 периодов с толщинами слоев InGaAs порядка 10–15 nm и слоев GaAs толщиной приблизительно 70 nm. Выращенная структура характеризовалась наличием в ней прорастающих к поверхности дислокаций, общая плотность которых, оцененная по ямкам травления, не превышала $10^4\text{--}10^5\text{ cm}^{-2}$. Последующее формирование пористой сверхрешетки было проведено стандартным методом электрохимического травления в спиртовом растворе фтористоводородной кислоты при одновременной оптической подсветке. Величина упругих напряжений в структуре до и после травления оценивалась методами рентгеновской дифрактометрии, а также по сдвигу линий в спектрах фотолюминесценции.

Рентгеновские измерения проводились на дифрактометре ДРОН-4 в окрестности пика GaAs (400) с монохроматором Ge (400), $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучение. Характерный вид рентгенодифракционного спектра $\Theta/2\Theta$ — сканирования от исходной периодической структуры приведен на рис. 1 (кривая 1). Анализ спектра показывает наличие длиннопериодной сверхрешетки в структуре (мелкие осцилляции на огибающей) и существование сложного профиля распределения состава в слоях $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ гетерокомпозиции, что в данном случае не является существенным фактором. Рентгенодифракционный спектр от пористой сверхрешетки (кривая 2) мало отличается от первоначальной кривой 1. Это говорит о том, что достаточно длительное травление образца практически не оказывает деструктивного влияния на структуру кристалла решетки слоя. Подгонка вычисленного спектра к экспериментальному (рекуррентные формулы динамического приближения теории рассеяния) с параметрами толщин и концентраций, как в исходной структуре, но с введением коэффициента релаксации, приводит

1* Письма в ЖТФ, 2002, том 28, вып. 24

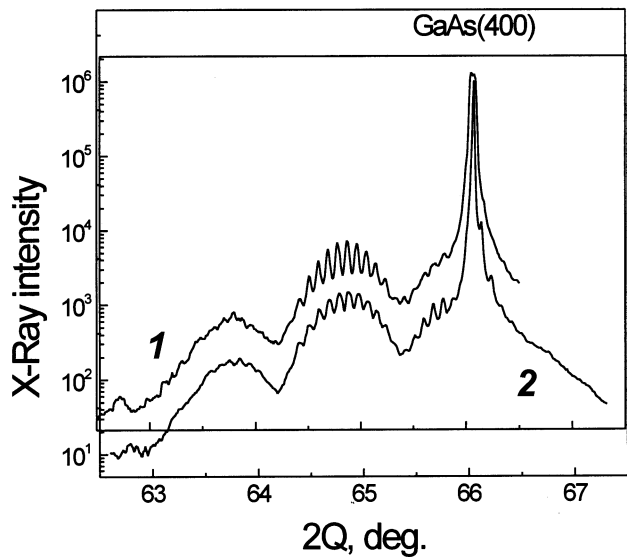


Рис. 1. Рентгенодифракционные спектры образцов сверхрешетки InGaAs/GaAs до (1) и после травления в течение 40 min (2).

к $R = 20\%$ (остаточная упругая деформация $RES = 80\%$). Данный факт, несмотря на небольшую величину релаксации, представляется достаточно важным, если заметить, что при создании буферного слоя на базе чистого пористого GaAs имеет место уменьшение постоянной решетки пористого материала по сравнению с постоянной решетки монокристаллического GaAs [7], что, наоборот, увеличивает упругую энергию, накапливаемую в выращиваемом рабочем слое InGaAs.

Более наглядное представление о действительном прохождении упругой релаксации в буферной пористой сверхрешетке позволяет получить сравнительный анализ спектров фотолюминесценции от монокристаллического и пористого образцов. Линии излучательной рекомбинации из квантово-размерных слоев InGaAs, снятые при температуре жидкого азота, представлены на рис. 2. Сопоставление положения линий 1 (монокристаллическая структура) и 2 (пористая структура) на данном рисунке демонстрирует для исследуемого образца наличие небольшого сдвига линии фотолюминесценции (для разных условий

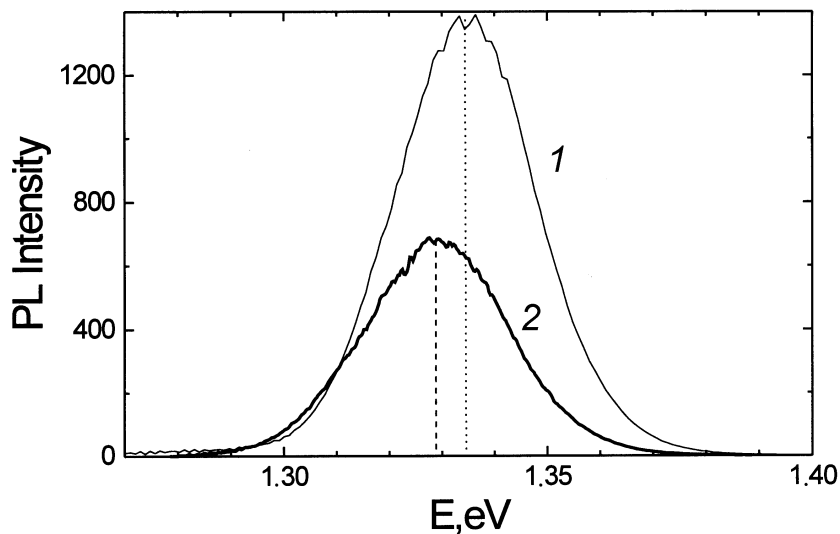


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции, снятые при $T = 77$ К от образца сверхрешетки InGaAs/GaAs до (1) и после травления в течение 40 min (2).

травления на величину $\sim 0.005 \div 0.008$ eV) в длинноволновую область спектра, указывая на уменьшение величины первоначально накопленных системой упругих напряжений. Положение линии люминесценции в данном материале, если исключить проявление эффекта размерного квантования в потенциальных ямах, задается, с одной стороны, составом тройного соединения в слоях InGaAs, с другой — деформацией сжатия в плоскости структуры. Для рассматриваемой в работе ситуации дополнительный сдвиг линии фотолюминесценции, который в принципе может проявиться при переходе от монокристаллической структуры слоя InGaAs к пористой вследствие эффекта дополнительного пространственного ограничения вдоль плоскости слоев сверхрешетки [8], был исключен в данном эксперименте низкой скоростью травления структуры.

Оценим компоненту сдвига линии фотолюминесценции в коротковолновую область спектра и связанную с упругой деформацией решетки слоя $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Полный сдвиг спектральной линии вследствие деформационного эффекта обусловлен изменением ширины запрещенной

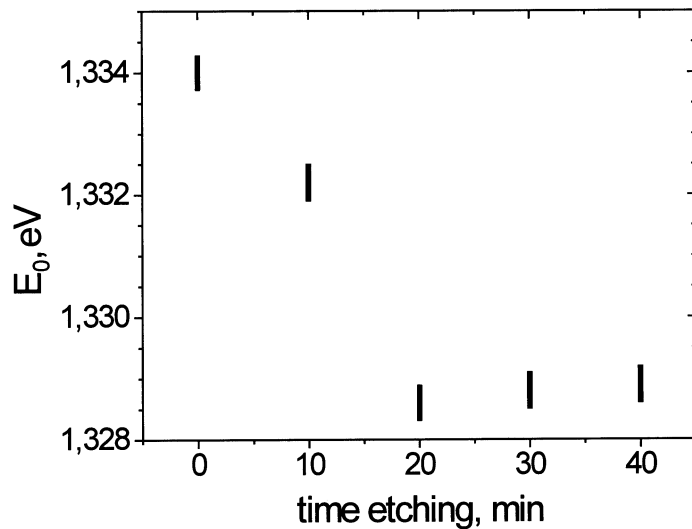


Рис. 3. Зависимости положения максимума линии фотолюминесценции E_0 от времени травления образца.

зоны тройного соединения из-за объемного сжатия структуры (ширина запрещенной зоны при этом растет) и одноосной деформации растяжения вдоль оси роста. Последняя приводит к расщеплению вырожденных валентных подзон, уменьшая тем самым ширину запрещенной зоны. В монокристаллической гетероструктуре доминирует объемный эффект, увеличивая ширину запрещенной зоны E_g в слое $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ приблизительно с $E_g = 1.18 \text{ eV}$ [9] (при $T = 77 \text{ K}$) для недеформированного объемного материала до $E_g = 1.24 \text{ eV}$ для псевдоморфного упруго напряженного слоя, выращенного на подложке GaAs [10]. Уменьшение ширины запрещенной зоны вследствие уменьшения накопленной упругой энергии в слоях пористого образца составляет величину порядка $0.005 \div 0.008 \text{ eV}$ (рис. 3). Небольшой в пределах $0.005\text{--}0.008 \text{ eV}$ длинноволновый сдвиг линии фотолюминесценции для пористой сверхрешетки говорит о незначительной (в пределах 10%), но все же релаксации, накопленной в сверхрешеточной структуре упругой деформации, что согласуется в пределах ошибки измерений с данными рентгенодифракционного анализа.

Таким образом, рентгенодифракционный анализ и сдвиг линий фотолюминесценции от подвергнутых электрохимическому травлению многослойных гетероэпитаксиальных структур InGaAs/GaAs указывает на прохождение в них релаксации упругих напряжений. Это дает возможность при использовании пористых сверхрешеток в качестве буферных слоев получить, хот и небольшой, но положительный эффект по отношению к буферным слоям как пористого арсенида галлия, так и монокристаллических сверхрешеток.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Б.Н. Звонкову за выращенные исходные образцы структур, проф. Е.С. Демидову (ННГУ) и с.н.с. ИФМ РАН Ю.Н. Бузынину за плодотворные дискуссии.

Работа выполнялась при поддержке грантов РФФИ (№ 01-02-16778; и №№ 01-02-06232; 02-02-06577 „МАС“).

Список литературы

- [1] *Mil'vidskii M.G., Vdovin V.I., Orlov L.K., Kuznetsov O.A., Vorotyntsev V.M.* Growth of Crystals. New York–London, Consultants Bureau, 1996. V. 20. P. 13.
- [2] *Орлов Л.К., Толомасов В.А., Потанов А.В., Вдовин В.И.* // Изв. вузов. Сер. Материалы электронной техники. 1998. № 2. С. 30.
- [3] *Yugova T.G., Vdovin V.I., Milvidskii M.G., Orlov L.K., Tolomasov V.A., Potapov A.V., Abrosimov N.V.* // Thin Solid Films. 1999. V. 336. N 1, 2. P. 112.
- [4] *Fitzgerald E.A., Samavedam S.B.* // Thin Solid Films. 1997. V. 294. N 1, 2. P. 3.
- [5] *Sorokin S.V., Ivanov S.V., Mosina G.N., Sorokin L.M., Musikhin Yu.G., Kop'ev P.S.* // Inst. Phys. Conf. Ser. (IOP Publishing Ltd, 1997). N 155. Chapter 3. P. 219.
- [6] *Yakovtseva V., Vorozov N., Dolgyi L., Levchenko V., Postnova L., Balucani M., Bondarenko V., Ladnedica G., Ferrara V., Ferrari A.* // Phys. sol. state (a). 2000. V. 182. P. 195.
- [7] *Бузынин Ю.Н., Гусев С.А., Дроздов Ю.Н., Красильник З.Ф., Мурель А.М., Ревин Д.Г., Шашкин В.Н., Шулешова И.В.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1996. № 5. С. 40.
- [8] *Орлов Л.К., Ивина Н.Л.* // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75. С. 584.
- [9] *Маделунг О.* Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. М.: Мир, 1967. С. 318.
- [10] *Орлов Л.К., Ивина Н.Л., Рубцова Р.А., Романов Ю.А.* // ФТТ. 2000. Т. 42. № 3. С. 537.